

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

2010

Robin Maralík

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Olejové tlumivky pro oblast VN**  
**Typové aplikace a základní požadavky**

**HV Oil Reactors**  
**Types Application and Basic Requirements**

2010

Robin Maralík

**Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne 5.5. 2010

.....  
Podpis studenta

Děkuji tímto vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Martinu Markovi, Ph.D. za jeho odbornou pomoc, užitečné připomínky a výbornou spolupráci.

## Abstrakt

Předložená bakalářská práce se zabývá přehledem vysokonapěťových tlumivek používaných v typových aplikacích pro oblast elektroenergetiky a požadavky na ně kladené. V jednotlivých kapitolách seznamuje čtenáře se základními pojmy, principem působení a konstrukčním uspořádáním tlumivek. Dále popisuje možnosti jejich využití v energetickém průmyslu s vysvětlením principu fungování u typových aplikací. Závěrem je uveden přehled požadavků a jmenovitých údajů, podle kterých se tlumivky navrhnou.

## Abstract

This bachelor work deals with an overview of high-voltage reactors used in standard applications for electricity and requirements applicable to them. Each chapter introduces the basic concepts and principles of action and structural arrangement of reactors. Also describes how to use them in the energy industry with an explanation of the principle of operation of the type of applications. Finally, an overview of requirements and nominal data according to which the inductors are proposed.

## Klíčová slova

tlumivka k omezení proudu, kompenzační tlumivka, spouštěcí tlumivka, tlumící tlumivka, filtrační tlumivka, zhášecí tlumivka, uzemňovací tlumivka, vyhlazovací tlumivka

## Keywords

current-limiting reactor, shunt reactor, starting reactor, damping reactor, filter reactor, arc-suppression reactor, neutral reactor, smoothing reactor

## Seznam použitých symbolů

$B$	magnetická indukce	(T)
$B_j$	magnetická indukce jádra	(T)
$B_s$	indukce nasycení	(T)
$C_A, C_B, C_C$	kapacity fází A, B, C	( $\mu\text{F}$ )
$F_m$	magnetomotorické napětí	(A)
$H$	intenzita magnetického pole	( $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ )
$H_l$	průmět vektoru $H$ do směru elementu dráhy $dl$	( $\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$ )
$I$	elektrický proud	(A)
$I_{CB}, I_{CA}$	fázory proudů fází B, C	(A)
$I_C$	poruchový proud	(A)
$I_P$	vykompenzovaný proud	(A)
$I_l$	statorový proud	(A)
$I_{ln}$	jmenovitý statorový proud	(A)
$L$	indukčnost cívky (tlumivky)	(H)
$M$	vzájemná indukčnost	(H)
$M_z$	záběrový moment motoru	(Nm)
$M_{zn}$	záběrový jmenovitý moment motoru	(Nm)
$Q$	jalový výkon	(VAr)
$U_0$	fázor napětí uzlu transformátoru	(V)
$U_A, U_B, U_C$	fázory sdružených napětí fází A, B, C	(V)
$U_{fA}, U_{fB}, U_{fC}$	fázory fázových napětí fází A, B, C	(V)
$U_m$	magnetické napětí	(A)
$U_l$	statorové napětí	(V)
$U_{ln}$	jmenovité statorové napětí	(V)
$X_L$	induktivní reaktance	( $\Omega$ )
$dl$	element dráhy	(m)
$d_{Ne}$	vnější průměr cívky	(m)
$d_{Ni}$	vnitřní průměr cívky	(m)
$f$	frekvence	(Hz)
$l_c$	výška cívky	(m)
$m$	počet jader	(-)
$s_j$	průřez jádra	( $\text{m}^2$ )
$s''$	plocha magnetického toku mezi vinutím a jádrem	( $\text{m}^2$ )
$s'''$	plocha magnetického toku v prostoru cívky	( $\text{m}^2$ )
$u_i$	indukované (svorkové) napětí	(V)
$u_{ie}$	indukované napětí	(V)
$u_k$	napětí nakrátko	(V)
$\omega$	úhlová rychlost	( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )

$\mu_r$	poměrná permeabilita	(-)
$\mu_0$	permeabilita vakua	(H·m <sup>-1</sup> )
$\Phi$	magnetický tok	(Wb)
$\Psi$	magnetický spřažený tok	(Wb)
$\Sigma\delta$	součet nemagnetických mezer	(m)
$\rho$	měrný elektrický odpor	(Ω·mm <sup>2</sup> /m)

## Obsah

ÚVOD.....	1
<b>1 TEORETICKÝ ROZBOR .....</b>	<b>2</b>
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY A VELIČINY MAGNETISMU .....	2
1.2 TLUMIVKY A REAKTORY OBECNĚ .....	7
1.2.1 Princip působení.....	9
1.2.2 Charakteristika tlumivky .....	9
1.2.3 Řízení reaktance tlumivek.....	11
1.2.4 Základní parametry tlumivek.....	12
1.3 MAGNETICKÉ MATERIÁLY TLUMIVEK .....	13
1.4 CHLAZENÍ TLUMIVEK.....	14
<b>2 TYPOVÉ APLIKACE VN TLUMIVEK V ENERGETICE.....</b>	<b>15</b>
2.1 TLUMIVKY PRO OMEZENÍ PROUDU.....	16
2.2 KOMPENZAČNÍ TLUMIVKY .....	19
2.3 TLUMIVKY PRO VYTVOŘENÍ UMĚLÉHO UZLU .....	22
2.4 ZEMNÍ TLUMIVKY .....	22
2.5 VYROVNÁVACÍ TLUMIVKY .....	23
2.6 ZHÁŠECÍ TLUMIVKY .....	24
2.7 VYHLAZOVACÍ TLUMIVKY .....	27
<b>3 PODMÍNKY A POŽADAVKY PRO VOLBU TYPOVÝCH VN TLUMIVEK .....</b>	<b>27</b>
3.1 PROVEDENÍ .....	27
3.2 DOVOLENÉ OTEPLENÍ.....	28
3.3 JMENOVITÉ ÚDAJE.....	28
3.4 ZKOUŠKY .....	32
<b>4 ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR .....</b>	<b>33</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>34</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>35</b>

## Úvod

Tlumivky používané pro oblast vysokého napětí představují nezastupitelný prvek zajišťující zlepšení poměrů v elektrických sítích, regulaci transformátorů, spolehlivý chod elektrických zařízení ve stavech provozních, popřípadě provozní bezpečnost ve stavech poruchových. Díky své konstrukční jednoduchosti jsou vysoce spolehlivé i v náročných průmyslových aplikacích jako je například omezení zkratových proudů při dotyku elektrod s taveninou u elektrické obloukové pece.

Konstrukci tlumivek lze přizpůsobit libovolným výkonům. Tím dostáváme široké uplatnění ve všech odvětvích elektrotechniky. Kromě aplikací využívaných v elektroenergetice, na které je tato práce zaměřena, nachází tlumivky použití i ve spotřební elektrotechnice (zapálení výboje u zářivek, filtry spínaných zdrojů), telekomunikační technice (filtrační, odrušovací tlumivky), výkonové elektrotechnice (vyhlazovací tlumivky tyristorových usměrňovačů, nepřímých měničů kmitočtu), atd.

Tlumivky využívané pro oblast vysokého napětí se vyrábějí v jednofázovém, nebo trojfázovém, vzduchovém, nebo olejovém provedení. Vzduchové provedení je používáno především do napětí 35 kV a vnitřní použití, zatímco olejové provedení je užíváno pro vyšší napětí a venkovní montáž. Podle typové aplikace buď s železným jádrem, nebo bez něho. Takovéto tlumivky bez železného jádra nazýváme reaktory a slouží především k omezení zkratových proudů. Konstrukce s železným jádrem se podobají transformátorům. Mají však jedno vinutí a jejich použití je zejména vhodné jako spouštěcí tlumivky pro tlumení proudových rázů střídavých motorů, pro regulaci proudů svařovacích transformátorů, pro zlepšení paralelního chodu transformátorů, kompenzaci nabíjecích kapacitních proudů v sítích vvn, či kompenzaci zemního spojení.

Téma bakalářské práce je zaměřeno na přehled tlumivek vn a jejich využití v typových aplikacích elektroenergetiky. První kapitola s názvem „Tlumivky a reaktory obecně“ definuje teoretický rozbor tlumivek a reaktorů, jejich základní rozdělení, princip působení, základní charakteristiky, konstrukční uspořádání, použití v elektrotechnice, vlastnosti, parametry. Druhá kapitola „Typové aplikace vn tlumivek v energetice“ pojednává o rozdělení tlumivek pro energetické účely a jejich typické aplikační využití. Třetí kapitola „Shrnutí podmínek a požadavků pro volbu typových vn tlumivek“ je zaměřena na shrnutí parametrů tlumivek pro jejich typové využití v elektroenergetice.



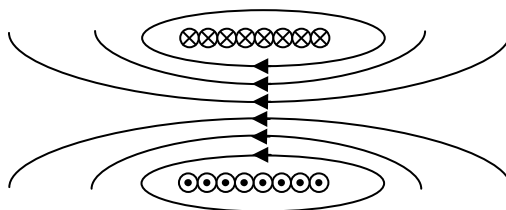
# 1 Teoretický rozbor

## 1.1 Základní pojmy a veličiny magnetismu

K objasnění základních vlastností a principu působení tlumivek je uvedena tato kapitola shrnující základní pojmy, veličiny a zákony magnetického pole.

### Magnetické pole solenoidu (válcové cívky)

Základním konstrukčním prvkem tlumivek je nejčastěji solenoid, který vznikne navinutím vodiče do tvaru kruhových závitů, přičemž každý závit vybudí průchodem proudu magnetické pole. Uvnitř válcové cívky působí homogenní pole (za předpokladu těsné blízkosti závitů) vlivem stejné hustoty indukčních čar. Z krajního závitu se siločáry rozbíhají, prochází okolím cívky a opět vstupují (zhušťují se) v závitu na protější straně. Směr působení magnetického pole, určíme pomocí Ampérova pravidla pravé ruky:



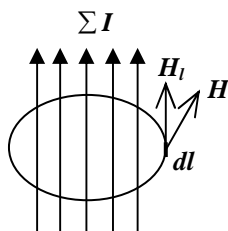
Obr. 1.1 Magnetické pole válcové cívky

### Magnetomotorické napětí, magnetické napětí

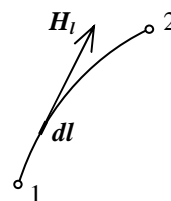
Magnetické pole je zobrazováno indukčními siločarami. Příčinou vzniku siločar je magnetomotorické napětí  $F_m$ . Je-li magnetické pole vybudeno elektrickým proudem, pak je proud magnetomotorickým napětím. Jedná se o skalární veličinu, jednotkou je A (Ampér). Pokud magnetické pole vybudí několik proudů, pak je magnetomotorické napětí dáno algebraickým součtem proudů, které indukční čára obepíná.

$$F_m = \int H \, dl = \int H_l \, dl = \sum I \quad [A; A \cdot m^{-1}; m, A] \quad (1.1)$$

,kde  $H_l$  je průmět vektoru  $H$  do směru elementu dráhy  $dl$



Obr. 1.2 Magnetické pole několika vodičů



Obr. 1.3 Magnetické napětí mezi dvěma body

Mezi libovolnými dvěma body indukční čáry můžeme definovat magnetické napětí  $U_m$ .

$$U_m = \int_1^2 H_l \, dl \quad [A; A \cdot m^{-1}; m] \quad (1.2)$$

### Intenzita magnetického pole

Prochází-li dlouhým přímým vodičem elektrický proud  $I$ , vytvoří se v kolmých rovinách na směr průchodu proudu magnetické siločáry. Intenzita magnetického pole  $H$  je vektor, tvořící tečnu v libovolném místě magnetické siločáry. Jednotkou intenzity magnetického pole je  $A \cdot m^{-1}$ .

Pro intenzitu ve vzdálenosti  $r$  od osy vodiče a) a pro vnitřní intenzitu kruhového vodiče b) platí:

$$\text{a) } H = \frac{U_m}{l} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad \text{b) } H = \frac{I}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{r}{a^2} \quad [A \cdot m^{-1}; A, m] \quad (1.3)$$

, kde  $l$ ...délka magnetické siločáry,  $a$ ...poloměr vodiče,  $r$ ...vzdálenost od osy vodiče

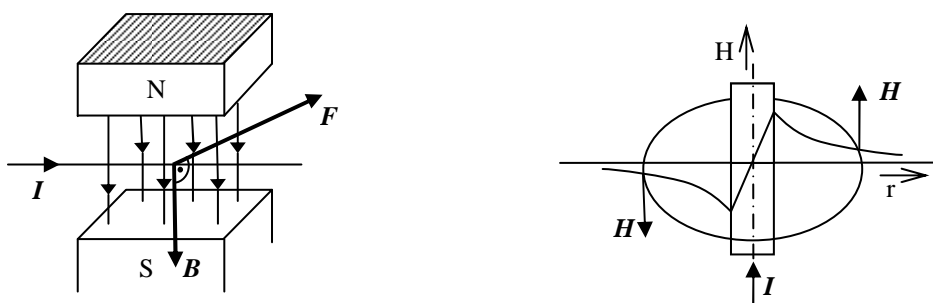
### Magnetická indukce

Magnetickou indukci  $B$  definujeme jako sílu, která působí na vodič s elektrickým proudem. Je to vektorová veličina určená velikostí a směrem působení. Jednotkou magnetické indukce je 1T (Tesla). Magnetická indukce feromagnetických materiálů dosahuje v praxi velikosti 1,5 - 2 T.

$$F = I \cdot [l \times B] \quad [N; A, m, T] \quad (1.4)$$

Je-li vodič kolmý ke směru působení magnetických siločar, pak mag. pole působí na vodič silou:

$$F = B \cdot I \cdot l \quad [N; T, A, m] \quad (1.5)$$



Obr. 1.4 Silové působení magnetického pole na vodič a intenzita magnetického pole v okolí vodiče

Závislost magnetické indukce  $B$  na intenzitě  $H$  vyjadřuje vztah:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H \quad [T; -, H \cdot m^{-1}, A \cdot m^{-1}] \quad (1.6)$$

,kde  $\mu_r$  představuje poměrnou permeabilitu prostředí a  $\mu_0$  permeabilitu vakua ( $4\pi \cdot 10^{-7} H \cdot m^{-1}$ )

### Magnetický tok

Magnetický tok  $\Phi$  představuje počet indukčních čar nacházejících se v magnetickém poli. Je to skalární veličina a je definován jako indukované napětí  $u_i$  v závitě při časové změně toku  $\Phi$ . Jednotkou magnetického toku je Wb (Weber)

$$u_i = \frac{d\Phi}{dt} \quad [V; Wb, s] \quad (1.7)$$

Magnetický tok  $\Phi$  lze též vyjádřit v závislosti na magnetické indukci  $B$  jako tok, který prochází plochou  $S$  při magnetické indukci  $B$ . Pokud by se jednalo o pole homogenní s vektorem  $B$  kolmým k ploše  $S$ , lze magnetický tok vyjádřit jako součin  $B$  a  $S$ .

$$\Phi = \int \int_S B_n \cdot ds, \quad \Phi = B \cdot S \quad [Wb; T, m^2] \quad (1.8)$$

,kde  $B_n$  je složka magnetické indukce  $B$  kolmá k ploše  $ds$ .

### Vlastní indukčnost

#### Statická definice:

Definuje indukčnost cívky  $L$  jako magnetický spřažený tok  $\psi$  (součet toků všech závitů), při průchodu proudu cívkou.

$$L = \frac{N \cdot \Phi}{I} = \frac{\psi}{I} \quad [H; Wb, A] \quad (1.9)$$

#### Dynamická definice:

Definuje indukčnost cívky  $L$  jako napětí indukované na cívce při časové změně proudu.

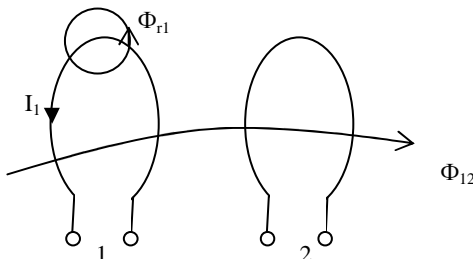
$$u_i = L \cdot \frac{di}{dt} \Rightarrow L = \frac{u_i}{\frac{di}{dt}} \quad [H; V, A, s] \quad (1.10)$$

### Vzájemná indukčnost

Působí-li magnetický tok závitů (cívky) i na ostatní závity (cívky) v prostoru, zavádíme pojem vzájemné indukčnosti  $M$ .

$$M = \frac{\Phi_{12}}{I_1} = \frac{\Phi_{21}}{I_2} \quad [H; Wb, A] \quad (1.11)$$

Proud  $I_1$  procházející závitem 1 vyvolá magnetický tok  $\Phi_1$ , který se dělí na tok  $\Phi_{r1}$  a tok  $\Phi_{12}$  procházející závitem 2.



Obr. 1.5 Vzájemná indukčnost

Dochází-li k časové změně toku  $\Phi_1$  v důsledku změny proudu  $I_1$ , indukuje se v závitě 2 napětí

$$u_{12} = \frac{d\Phi_{12}}{dt} = M \frac{di_1}{dt} \quad [V; H, A, s] \quad (1.12)$$

Analogický postup platí pro závit 2.

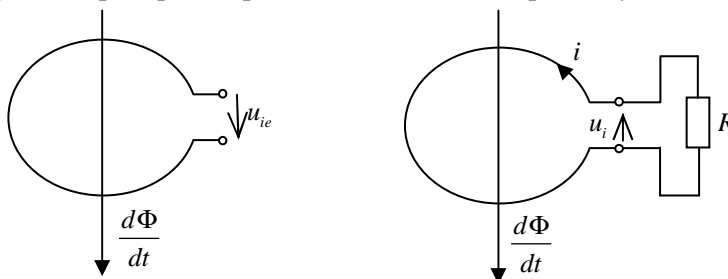
### Faradayův indukční zákon

Zákon definuje fyzikální podstatu elektromagnetické indukce. Máme-li nezatížený vodič ve tvaru smyčky, jehož omezenou plochou prochází časově proměnný magnetický tok  $d\Phi/dt$ , indukuje se ve smyčce elektrické napětí  $u_{ie}$ . Polarita indukovaného napětí má opačný smysl, než napětí zdroje, který vyvolává časově proměnný tok (viz Lenzovo pravidlo).

$$u_{ie} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad [V; Wb, s] \quad (1.13)$$

### Lenzovo pravidlo

Znaménko mínus ve vzorci (1.13) odůvodňuje Lenzovo pravidlo, jehož podstata plyne ze zákona zachování energie. Vysvětlení zákona znázorňuje obr.1.6. Uzávěme-li vodivou smyčku nacházející se v časově proměnném magnetickém poli, začne protékat indukovaný proud. Směr proudu je takový, že jeho magnetické pole působí proti změně, která tento proud vyvolala.



Obr. 1.6 Indukované napětí a proud v závitě

Pro jednodušší orientaci vzhledem k vnějším obvodům připojených na tento zdroj indukovaného napětí, zavádíme pojem svorkové napětí, pro nějž platí vztah (1.14)

$$u_i = -u_{ie} = \frac{d\Phi}{dt} \quad [V; Wb, s] \quad (1.14)$$

### Feromagnetické materiály

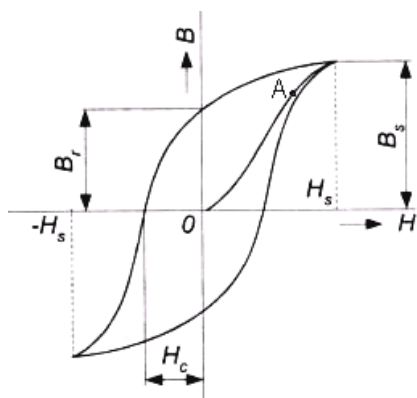
Základními feromagnetickými prvky jsou: železo, kobalt, nikl. Vložením těchto materiálů do magnetického pole, dochází k natočení magnetických momentů atomů ve směru magnetování a následnému zesílení magnetického pole. Míru zesílení účinků magnetického pole určuje poměrná permeabilita  $\mu_r$  (pro feromagnetika je  $\mu_r \gg 1$ ).

### Hysterezní smyčka

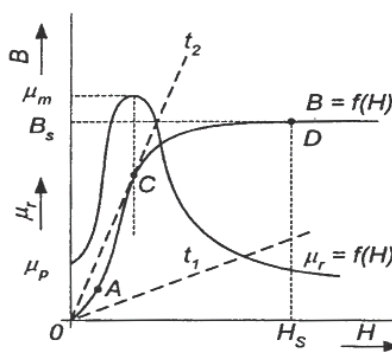
Udává závislost magnetické indukce  $B$  na velikosti intenzity magnetického pole  $H$  (obr 1.7). Křivku vycházející z bodu 0 nazýváme křivkou prvotní magnetizace (materiál nebyl před měřením zmagetován). Při zvyšování intenzity pole na hodnotu  $H_s$ , nabývá magnetická indukce své maximální hodnoty (materiál je nasycen). Zpětným snížením proudu (tedy intenzity  $H$ ) na nulovou hodnotu, dosáhne magnetická indukce hodnoty remanentní indukce  $B_r$ . Chceme-li nastavit koercitivní intenzitu  $H_c$ , tedy nulovou magnetickou indukci  $B$ , je nutné změnit smysl budícího proudu.

### Průběh prvotního magnetování a permeability $\mu_r$

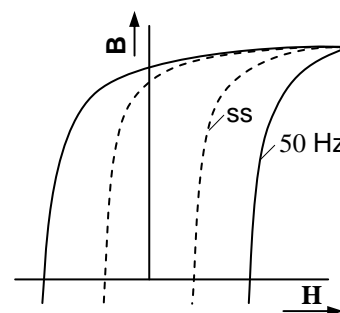
Ze závislosti obr. 1.8 je patrné, že poměrná permeabilita  $\mu_r$  je závislá na budícím proudu. Své maximální hodnoty nabývá v lineární části křivky prvotní magnetizace (bod C). Při vysokých hodnotách intenzity magnetického pole dochází k poklesu permeability až na hodnotu  $\mu_r = 1$ .



Obr. 1.7



Obr. 1.8



Obr. 1.9

### Statická a dynamická hysterezní smyčka

Rozdíly mezi stejnosměrným (statickým) a střídavým (dynamickým) magnetováním zobrazuje obr. 1.9. Dynamická křivka se rozšiřuje s rostoucím kmitočtem, zatímco pro nízké frekvence se přibližuje křivce statické. Plocha hysterezní smyčky odpovídá energii, kterou musíme dodat při magnetování. Jelikož se u střídavého magnetování uplatňují ztráty vířivými proudy, má dynamická charakteristika větší plochu. Proto se plechy pro střídavé magnetování izolují.

[1], [2], [4]

## 1.2 Tlumivky a reaktory obecně

Pod souhrnným označením tlumivky rozumíme elektrické součástky, zajišťující zvětšení impedance (reaktance) elektrického obvodu za účelem jeho řízení, zlepšení parametrů, nebo ochrany elektrických zařízení, současně i osob před nežádoucími účinky poruchových proudů. Jako reaktor označujeme tlumivku bez železného (feromagnetického) jádra s velkou konstantní indukčností. Jejich použití nachází uplatnění převážně pro omezení zkratových proudů u zařízení velkých výkonů. Zvláštním typem tlumivky je přesytka. Je to tlumivka s feromagnetickým jádrem bez vzduchové mezery, u které můžeme měnit indukčnost (reaktanci) sycením jádra stejnosměrným proudem (má dvě vinutí).

### Základní rozdělení tlumivek

podle provedení	<ul style="list-style-type: none"><li>• tlumivky s železným jádrem</li><li>• tlumivky bez jádra</li></ul>
typového využití	<ul style="list-style-type: none"><li>• nn aplikace</li><li>• vn aplikace</li></ul>
pracovního kmitočtu	<ul style="list-style-type: none"><li>• síťové</li><li>• nízkofrekvenční</li><li>• vysokofrekvenční</li></ul>
podle regulace	<ul style="list-style-type: none"><li>• neměnné</li><li>• říditelné (regulace stupňovitá, plynulá)</li></ul>

### Využití tlumivek v elektrotechnice

Tlumivky je možno konstruovat pro široký rozsah výkonů a indukčností. Díky tomu nachází jejich uplatnění v různých oborech elektrotechniky. Typovým aplikacím užívaných v energetice je věnována kapitola s názvem „Typové aplikace vn tlumivek v energetice“. Pro přehlednost je vhodné uvést i některé základní využití v ostatních odvětvích elektrotechniky.

- **vyhlazovací tlumivky**

Využití těchto tlumivek nachází uplatnění ve filtrech napájecích stejnosměrných zdrojů, nebo jako prvek meziobvodu nepřímého měniče kmitočtu s proudovým střídačem. U obou těchto aplikací zpomaluje nárůst usměrněného proudu a prodlužuje dobu jeho trvání.

- **tlumivky pro ochranu tyristorů**

Obvody s tyristory pracují se strmými nárůsty proudu spojenými s rychlými změnami napětí. Pro ochranu provozní bezpečnosti nesmí proud, překročit stanovené minimální časové intervaly. Příkladem použití těchto tlumivek mohou být řízené usměrňovače pro ovládání stejnosměrných motorů. Ochrana tyristorů spočívá v určité časové prodlevě potřebné k nasycení jádra tlumivky provozním proudem tyristorů a tím dochází k pozvolnému nárůstu proudu.

- **filtrační tlumivky**

Filtračních tlumivek se využívá buď ve spojení s kondenzátory pro LC filtry, nebo také pro samostatné sériové spojení tlumivky s chráněným zařízením. Obě možnosti slouží pro filtraci nežádoucích harmonických proudů. Princip působení je založen na základních vlastnostech cívek a kondenzátorů (cívky kladou střídavému proudu reaktanci, která se s rostoucím kmitočtem zvětšuje a naopak u kondenzátorů s rostoucím kmitočtem reaktance klesá). LC filtr tvoří rezonanční obvod naladěný na harmonickou frekvenci, pro kterou vykazuje minimální impedanci. Podle specifického využití filtrů (dolnoproustní, hornoproustní, pásmová zadrž i propust) se uspořádávají do tvaru T,  $\Pi$ , nebo L. Možnosti uplatnění nachází v miniaturním provedení ve sdělovací technice, dále u spínaných zdrojů, frekvenčních měničů, usměrňovačů, atd.

- **odrušovací tlumivky**

Hlavním úkolem odrušovacích tlumivek je odrušení nežádoucích vysokofrekvenčních složek proudu, která by mohla ovlivnit funkci chráněného zařízení (elektrické rozvaděče, řídicí obvody, spínací obvody). Tyto tlumivky se podobně jako filtrační tlumivky užívají buď samostatně, nebo tvoří v kombinaci s kondenzátory odrušovací filtry. Rozdíl je v tom, že prvky jsou navrženy jako vysokofrekvenční. Často se využívá tlumivek na toroidních jádrech.



Obr. 1.10 Tlumivky využívané v oblastech nízkého napětí

[1], [2], [3], [5]

### 1.2.1 Princip působení

Jak již bylo zmíněno v úvodu, konstrukčně se tlumivka podobá transformátorům, má však jedno vinutí (tlumivka s Fe jádrem). Základním parametrem ovlivňujícím působení tlumivky je indukčnost  $L$ , jejíž velikost souvisí s konstrukčním uspořádáním. Indukčnost přímo ovlivňuje impedanci (reaktanci) elektrického obvodu, do kterého je tlumivka zapojena. Prochází-li tímto obvodem střídavý proud, pak vzniká v jádru tlumivky časově proměnný magnetický tok  $\Delta\Phi / \Delta t$ . Podle indukčního zákona (viz. kapitola 1.1) se při této časové změně magnetického toku spřaženého s vodivou smyčkou, indukuje elektrické napětí  $u_i$ .

Pro tlumivku s  $N$  závity platí:

$$u_i = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad [V; -, Wb, s] \quad 1.15$$

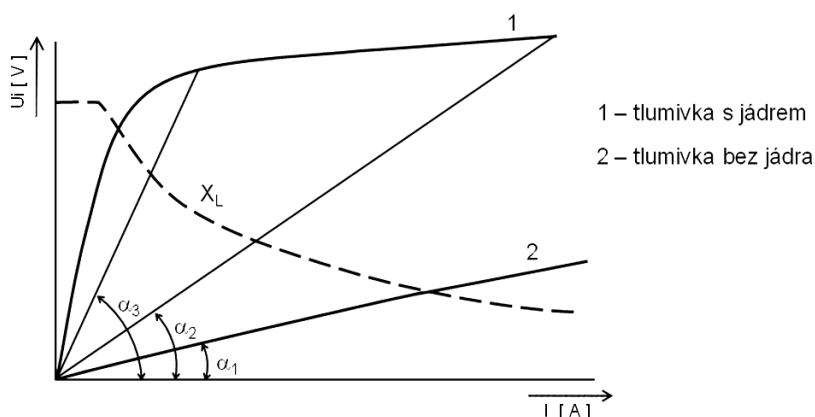
Indukované napětí  $u_i$  vyvolává úbytek napětí na tlumivce a tím dochází k poklesu napětí za tlumivkou. [2], [4]

### 1.2.2 Charakteristika tlumivky

Charakteristika tlumivky udává závislost změny indukovaného napětí  $u_i$ , též nazývaného reaktančním napětím na procházejícím proudu. Pokud je tlumivka v provedení s jádrem z feromagnetického materiálu, má její charakteristika tvar magnetizační charakteristiky (obr. 1.11). Naproti tomu tlumivka bez jádra, popřípadě s jádrem z nemagnetických materiálů, má charakteristiku přímkovou. Impedance tlumivky má komplexní charakter. Činný odpor je možno díky jeho zanedbatelnému vlivu neuvažovat. Jalový odpor (reaktanci) lze vyjádřit poměrem indukovaného napětí  $U_i$  a proudu  $I$ .

$$X_L = \frac{U_i}{I} \quad [\Omega; V, A] \quad 1.16$$

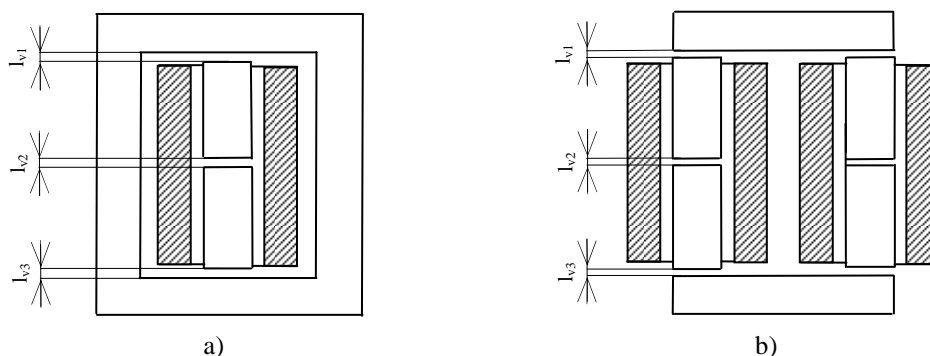
Obecně je reaktance závislá na frekvenci a konstrukčním uspořádáním tlumivky. Tlumivky s feromagnetickým jádrem mají reaktanci závislou na sycení jádra. Tlumivky bez jádra, nebo s jádrem z nemagnetických materiálů mají reaktanci poměrně malou a nezávislou na procházejícím proudu.



Obr. 1.11 Charakteristika tlumivky



Z obr. 1.11 je zřejmé, že závislost úbytku napětí na proudu u tlumivek s železným jádrem je využitelná pouze v úzkém rozmezí a u tlumivek bez jádra dosahují úbytky napětí malých hodnot. Pro lineární závislost indukovaného napětí na proudu v širokém rozsahu, využíváme tlumivek s feromagnetickým jádrem, které má mezery vzduchové, nebo z nemagnetických materiálů. Mezery je vhodné konstruovat raději ve větším počtu s menšími rozměry. Tím je zajištěn malý vliv rozšíření magnetického toku v poměru k průřezu jádra.



Obr. 1.12 Tlumivky s železným jádrem s vzduchovými mezerami v provedení a) plášťové, b) jádrové

Konstrukce tlumivek je možná buď v provedení jádrovém s polovinou cívky na každém jádře, nebo plášťovém.

### Výpočet tlumivky

Pro návrh tlumivky je výchozím parametrem indukce v jádru  $B_j$  (volí se přibližně 0,8T) a průchozí výkon  $Q$ . Na základě těchto veličin můžeme stanovit vzduchový prostor všech nemagnetických mezer  $\Sigma\delta$  na jednom jádru za předpokladu, že budou mezery obklopeny vinutím.

$$\Sigma\delta = \frac{5 \cdot 10^{-4} \cdot Q}{m f B_j^2 s_j} \quad [m; kVar, Hz, T, m^2] \quad 1.17$$

, kde  $m$  je počet jader s mezerami,  $s_j$  odpovídá průřezu jádra zvoleného podle průřezu transformátoru stejného výkonu.

Reaktance jádra se skládá z reaktance  $X_1$  vyvolané tokem v nemagnetických mezerách, reaktance  $X_2$  vyvolané tokem v prostoru mezi vinutím a jádrem a reaktance  $X_3$  vyvolané tokem v prostoru vinutí cívky.

Pro celkovou reaktanci tlumivky platí:

$$X = \frac{8\pi^2 f N^2}{10^7} \left( \frac{1}{\Sigma\delta / s_j} + \frac{s''}{l_c} + \frac{s'''}{3l_c} \right) \quad [\Omega; Hz, -, m^2, m] \quad 1.18$$

$$s'' = 0,785(d_{N_i}^2 - d_j^2)$$

$$s''' = 0,785(d_{N_e}^2 - d_{N_i}^2)$$

, kde  $N$  je počet závitů na jednom jádru,  $\delta$  - délka jednotlivé mezery v jádru,  $s'_j$  - zvětšený průřez jádra vyklenutím magnetického toku v mezeře,  $l_c$  - výška cívky,  $d_{Ni}$  - vnitřní průměr cívky,  $d_{Ne}$  - vnější průměr cívky,  $s''$  - plocha toku mezi vinutím a jádrem,  $s'''$  - plocha toku v prostoru cívky

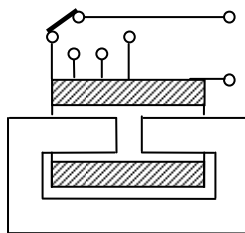
[4], [5], [8]

### 1.2.3 Řízení reaktance tlumivek

Některé tlumivky vyžadují plynulou regulaci reaktance, které dosahujeme jejich konstrukčním uspořádáním. Výsledkem je změna indukčnosti (reaktance) v potřebném rozsahu a tím i změna úbytku napětí na tlumivce v provozním stavu. Příkladem využití v aplikacích vn může být potlačení oblouku při zemním zkratu, kompenzace kapacitních proudů při zemním spojení (zhášecí tlumivky), kde je potřeba v průběhu života sítě přizpůsobit reaktanci tlumivky aktuální velikosti kapacity vedení pro bezproblémový provoz. Další uplatnění nachází říditelné tlumivky u svařovacích transformátorů. Pro ovládání svařovacího transformátoru se tlumivka zapojuje do série s výstupním, nebo vstupním (výhodné pro přepínač odboček z důvodu nižších proudů) vinutím transformátoru.

#### Změna reaktance

Z podstaty fyzikální principu tlumivky vyplývá, že změnu velikosti reaktance lze provést změnou počtu závitů, změnou magnetického toku v jádře, popřípadě sycením jádra stejnosměrným proudem. Velikost magnetického toku ovlivníme změnou velikosti vzduchové mezery.



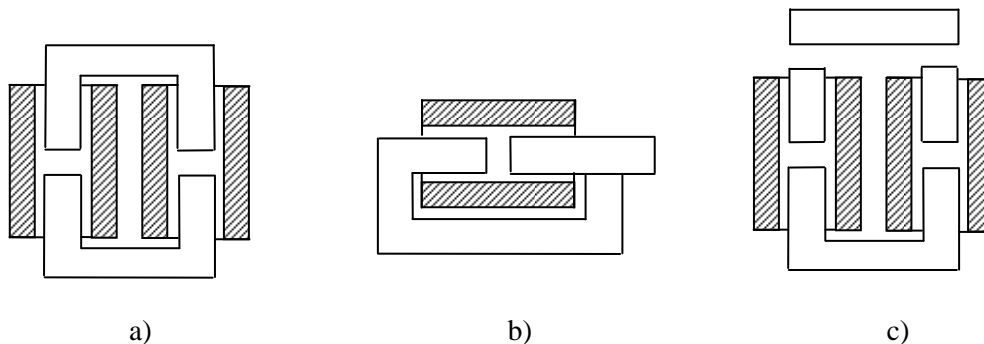
Obr. 1.13 Tlumivka s přepínatelným počtem závitů

#### 1) Tlumivka s přepínáním počtu závitů

K požadované změně indukčnosti (reaktance) dochází vlivem změny počtu zapojených závitů, kterými protéká proud. Jádro tlumivky je tvořeno magnetickým materiálem s konstantní vzduchovou mezerou (pro lineární závislost reaktančního napětí na proudu). Počet závitů se mění za pomoci přepínače odboček vinutí. Stupňovitá změna proudu předurčuje tlumivku pro méně náročné aplikace. Výhodou je jednoduchá konstrukce a vysoká životnost.

## 2) Tlumivka se změnou velikosti vzduchové mezery

Reaktanci tlumivky lze přizpůsobovat plynulou změnou vzduchové mezery mezi dvěma oddělenými částmi jádra tlumivky. Používá se šroub uchycený v pevné části, který prochází maticí v pohyblivé části. Pohyblivá část obvodu má nepříznivý účinek na vznik dynamických sil (vibrací), které je nutno eliminovat. Z tohoto důvodu je nejpoužívanější konstrukce b), kde je pohyblivá část opřena o pevnou část magnetického obvodu.



Obr. 1.14 Tlumivky se změnou vzduchové mezery

Výhodou tlumivek se změnou velikosti vzduchové mezery je plynulá změna indukčnosti (plynulé nastavení). Nepříznivou vlastností je poměrně složitá konstrukce pro zachycení vibrací pohyblivé části.

[4]

### 1.2.4 Základní parametry tlumivek

Každá tlumivka musí být opatřena štítkem umístěným na viditelném místě s uvedením základních parametrů. Údaje musí být čitelné po celou dobu užívání zařízení. Povinné údaje se liší podle typu tlumivky. Následující informace musí být povinně uvedeny na všech tlumivkách vn. Specifické povinné parametry typových tlumivek jsou uvedeny v normě ČSN EN 60076-6.

- typ tlumivky (tlumící, kompenzační, filtrační,...)
- provedení (vnitřní / venkovní)
- jmenovitá frekvence
- jmenovité napětí
- jmenovitý proud
- druh chlazení
- izolační hladina
- název výrobce
- výrobní číslo s rokem výroby
- číslo vztažné normy
- hmotnost zařízení, hmotnost izolačního oleje (jeli v olejovém provedení)

[15], [17]

### 1.3 Magnetické materiály tlumivek

Magnetický obvod tlumivek je tvořen ocelovými plechy s přidavkem křemíku (1 až 3,5% Si), který má za následek zvýšení elektrického měrného odporu a tedy i snížení ztrát. Jeho negativní vlastností je zhoršení tvárnosti materiálů (důležitá vlastnost pro válcování).

#### Plechys s orientovanou a neorientovanou strukturou

Křemíkové oceli se dělí dle postupu výroby na neorientované plechy s izotropní strukturou (shodné magnetické vlastnosti ve všech směrech) a na orientované plechy s anizotropní strukturou (magnetické domény jsou orientovány se směrem válcování). Neorientované plechy se vyrábějí ve formě výseků (transformátorové plechy) tvaru E, EI, EE, ED, M, UI dle norem DIN 41302 a IEC 740. Jejich použití je vhodné pro transformátory a tlumivky malých výkonů, nebo magnetické obvody točivých strojů.

#### Srovnání křemíkové oceli s orientovanou a neorientovanou strukturou

Materiál:	$B_s$ (T)	$\rho$ ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}$ )	$\mu_{\max}$	ztráty (W/kg)	při		použití
Křemíkové oceli (Fe-Si)					f (Hz)	B (T)	
neorientované	2-2,1	0,35	5 000	2,7	50	1	motory
orientované	2	0,48	8 000	0,9	50	1,5	transformátory

#### Plechys válcované za studena (orientované)

K výrobě tlumivek se používají především tzv. orientované plechy obvyklé tloušťky 0,23 až 0,35 mm izolované vrstvami křemičitanu hořečnatého (Kerizol). Výroba orientovaných plechů Gossovou texturou zaručuje minimální ztráty při magnetování ve směru totožném se směrem válcování. Materiál válcovaný za tepla, následně za studena se navíjí na formovací elementy, následuje žíhání, lepení závitů syntetickou pryskyřicí, řezání jádra, broušení. Jádra se po nasunutí cívek stahují páskou. Výsledkem je jádro nazývané dle konstrukce C-jádra, popř. E- jádra dle normy DIN 41309. Alternativu děleného C-jádra nabízí tzv. Unicore-jádra, složené z dílčích polovin, které se postupně zasouvají do cívek. Tlumivky využívají jader s označením BUTT Unicore v provedení jednofázové a třífázové. Výhodou jsou nízké měrné ztráty, jednoduchá výroba i montáž, příznivá cena. Pro tlumivky a transformátory vysokých výkonů je magnetický obvod skládán z obdélníkových plechů tak, aby směr válcování souhlasil se směrem magnetického toku.

Výhodou orientovaných plechů oproti neorientované struktuře je především nižší hodnota měrných ztrát, menší hmotnost magnetického obvodu, úspora materiálu vinutí.

[2]

## 1.4 Chlazení tlumivek

Při provozu tlumivek vznikají ztráty ve vinutí, popřípadě ve feromagnetickém obvodu, pokud se jedná o tlumivku s jádrem. Tyto ztráty mají za následek oteplování vinutí a magnetického obvodu. Pokud oteplení přesáhne určitou mez, dojde k narušení izolace a následnému poškození tlumivky. Proto je nutné přebytečné teplo odvádět. Dovolené oteplení pro jednotlivé druhy izolací udává norma ČSN EN 60085.

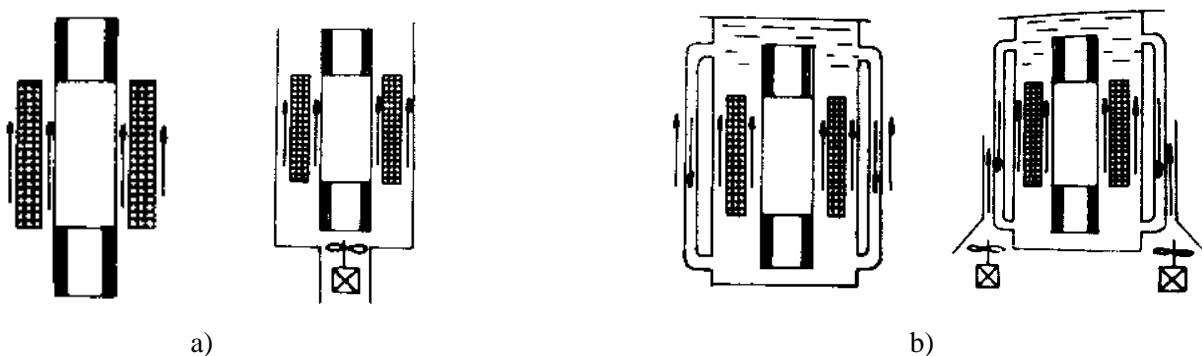
### Způsoby chlazení

Vzduchové chlazení – u vzduchového chlazení se část tepla odvádí prouděním (konvekci), a část tepla sáláním (radiací). Rozlišujeme dva základní typy chlazení.

- volné chlazení: proudění nastává díky tomu, že teplejší část vzduchu stoupá vzhůru, jako následek vzrůstajícího tlaku vzduchu.
- nucené chlazení: má vyšší účinnost než volné chlazení, odvod tepla z aktivních částí je realizován pomocí ventilátoru. Nevýhodné, téměř se u tlumivek nepoužívá (ventilátor představuje ztráty)

U vzduchového chlazení se používají aktivní materiály větších rozměrů než u následujícího olejového chlazení (za podmínky stejně výkonných zařízení).

Olejové chlazení – chladicí medium je olej. Odvod tepla je možno řešit obdobně jako u vzduchového chlazení. Výhodou je lepší účinnost ochlazování a izolační schopnost oleje, na úkor složitější a těžší konstrukce. Je totiž nutno zabránit styku oleje se vzduchem a také dilataci. To zajišťuje konzervátor umístěný na víku nádoby.



Obr. 1.15 způsoby chlazení tlumivek a) vzduchové chlazení, b) olejové chlazení

Pro zajištění izolačních a chladících schopností se používají dva typy olejových náplní:

- minerální oleje
- syntetické oleje

Základní rozdíl je v odolnosti proti požáru. Minerální oleje mají vysokou odolnost proti oxidaci v průběhu jeho života a nízkou cenu ve srovnání se syntetickými oleji. Nevýhodou je hořlavost. Z toho plyne omezené využití a velké investice na protipožární zabezpečení. Proto se dnes používají nehořlavé syntetické oleje i přes některé jejich nevýhody (vylučování agresivních par, vyšší cena).

[6]

## 2 Typové aplikace VN tlumivek v energetice

Obecně můžeme tlumivky používané v elektroenergetice rozdělit dle následujícího provedení

- jednofázové, nebo trojfázové
- suché nebo olejové
- bez feromagnetického jádra, nebo s feromagnetickým jádrem
- vnitřní nebo venkovní použití
- s konstantní nebo proměnnou indukčností

podle aplikace ve kterých jsou tlumivky používány, rozlišujeme dle normy ČSN EN 60076-6

- **tlumivky pro omezení proudu**

Využívá se jak tlumivek, tak i reaktorů zapojených do série se zařízením u kterého omezují proudy při poruchových stavech. Také omezují záběrový proud při spouštění střídavých motorů, nebo vyrovnávací proud paralelně pracujících obvodů (např. paralelní chod transformátorů).

- **kompensační tlumivky**

Jedná se o tlumivky, které se zapojují paralelně k systému, kde kompenzují kapacitní složku proudu.

- **uzemňovací tlumivky**

Účel použití těchto tlumivek spočívá ve vytvoření umělého uzlu v trojfázových sítích bez nulového bodu.

- **tlumící tlumivky**

Jejich použití je obdobné jako u omezujících tlumivek. Tlumí nabíjecí proud kondenzátoru a zároveň omezují poruchový proud, který by mohl kondenzátory poškodit.

- **filtrační tlumivky**

Zapojují se v sériové, nebo paralelní kombinaci s kondenzátory k ochraně zařízení před nežádoucími harmonickými frekvencemi.

- **zhášecí tlumivky**

Tlumivka je vyráběna v jednofázovém provedení, zapojuje se mezi uzel transformátoru a zem pro kompenzaci kapacitního proudu, při jednofázovém zemním spojení.

- **vyhlazovací tlumivky**

Základní využití vyhlazovacích tlumivek v energetice je ve stejnosměrných sítích k omezení harmonických proudů.

[15], [17]

## 2.1 Tlumivky pro omezení proudu

### Reaktory pro omezení zkratových proudů

Jak již bylo zmíněno v úvodu, reaktor je tlumivka bez železného jádra. Jeho indukčnost je tedy konstantní a i přes chybějící jádro poměrně vysoká. To má nepříznivý vliv na úbytek napětí v provozním stavu a u velkých výkonů se uplatňuje také vliv ztrát. Obecně jsou používány pro omezení zkratových proudů u zařízení velkých výkonů (alternátory, transformátory), kde poruchové proudy vyvolávají obrovské dynamické a tepelné namáhání vedoucí k destrukci těchto elektrických zařízení. Použití reaktorů nabízí výhody při dimenzování strojů, přístrojů, vedení nacházejících se v proudovém okruhu reaktoru. Zařízení mohou být navrženy na menší zkratovou odolnost a tedy i levnější. Další výhoda reaktorů se uplatňuje u zkratu v blízkosti alternátoru, kdy se díky reaktoru udrží napětí na přípojnících. Jeli toto napětí větší než  $\frac{1}{2} U_n$ , je alternátor schopen udržet se v synchronismu.

#### Konstrukce

Základní odlišnosti v konstrukci reaktorů závisí na provedení (jednofázové, trojfázové), výrobních materiálech, parametrech soustavy (hladina napětí jmenovitý proud, nárazový proud,...), vlivu vnějších podmínek. Reaktory se vzduchovým chlazením se vyrábějí pro vnitřní provedení až do napětí 35 kV, pro velké výkony, venkovní provedení, nebo jiné náročné provozní podmínky se využívá chlazení olejové.

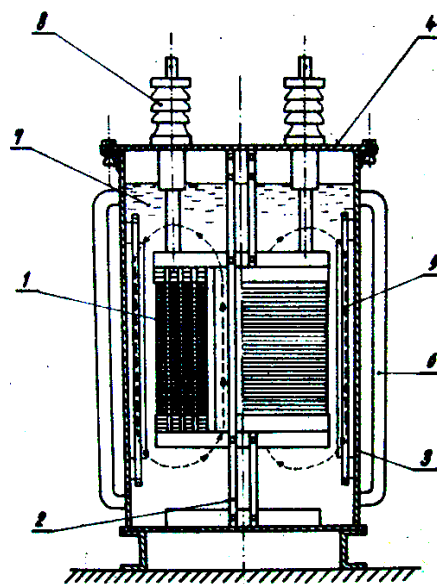
### Uspořádání omezovacích reaktorů

- vertikálně – 3 fáze nad sebou
- stupňovitě – 2 fáze nad sebou, 1 umístěna odděleně
- horizontálně – 3 fáze vedle sebe

Vinutí je zhotoveno z měděných, nebo hliníkových pásových vodičů (nižší cena, lehčí konstrukce). V praxi se používají dva základní způsoby vinutí. Vrstvové pro napětí do 10 kV u suchých reaktorů, nebo pro vyšší napětí vinutí deskové, které je provedeno z deskových cívek s mezery tvořené vložkami. Vinutí vrstevné se provádí v několika vrstvách na sobě vinutých jako šroubovice. Tepelná izolace vodičů je nejčastěji třídy F. U jednodušších aplikací se vrstvy oddělují izolací z neoflexu, nebo u náročnějších aplikací se užívá pro oddělení vodičů distančních vložek, popřípadě jsou vodiče zality v betonu.

### Popis olejového reaktoru

Vrstvové vinutí 1 je provedeno tak, že mezi každými dvěma vrstvami se nacházejí ventilační kanálky zajišťující chlazení vinutí. Držák cívky 2 spojen s kostrou zajišťuje upevnění cívky v nádobě (3 – dno nádoby, 4 – víko nádoby). Stínící svazky 5 uvnitř nádoby jsou provedeny z transformátorových plechů a zabráňují ztrátám a následnému ohřevu nádoby. Také je omezeno působení magnetického pole na okolní zařízení. Chladicí trubky 6 zajišťující odvod tepla oleje 7 a jsou vedeny na povrchu nádoby. Pro vyvedení vývodů vinutí je reaktor opatřen porcelánovými průchodkami 8.



Obr. 2.1 Řez jednofázovým olejovým reaktorem

### Typové aplikace omezujících reaktorů

Typickou energetickou oblastí, kde se reaktory uplatňují jsou elektrárny. Obr. 2.2 zobrazuje možnosti umístění reaktorů.

#### 1. Reaktory mezi alternátorem a přípojnici

Tento případ zapojení se používá u alternátorů pro zvětšení jejich rozptylové reaktance. Reaktory jsou zapojeny mezi alternátor a přípojnou sběrnici k zajištění provozní bezpečnosti alternátoru při zkratech na přípojnici.



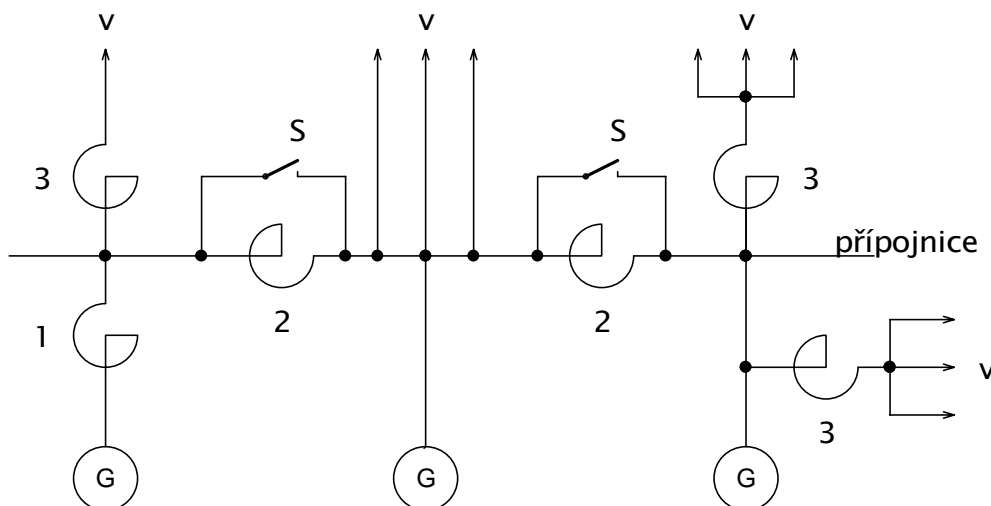
## 2. Reaktory v přípojnicích

Jejich využití nabývá významu u elektráren vysokých výkonů. Funkce spočívá v omezení zkratového proudu dodávaného alternátory do sousední části soustavy. Spínač S, zapojený paralelně k reaktoru, přemostňuje tento reaktor, nastane-li potřeba dodávat výkon do sousední části soustavy při výpadku alternátoru pracujícího pro tuto soustavu (v normálním stavu napájí každý z alternátorů svou část soustavy). Ovšem při přemostnění reaktoru zaniká jeho působení při zkratu.

## 3. Reaktory ve vývodech vedení

Stejný princip jako předchozí, omezení zkratového proudu ve vývodech z přípojnice.

Další aplikací, ve které se používá omezujících reaktorů v elektrárně je u synchronizační přípojnice alternátorů o vysokých výkonech.



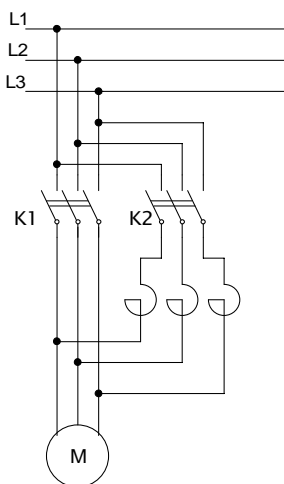
Obr. 2.2 Možnosti využití reaktorů v elektrárně

## Spouštěcí tlumivky

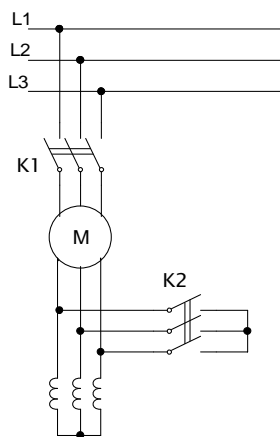
Spouštěcích tlumivek (reaktorů) je využíváno pro sériové spojení se střídavými asynchronními motory za účelem omezení záběrového proudu při jejich spouštění. Obr. 2.3 zobrazuje schéma zapojení, díky kterému se motor rozbíhá se sníženým statorovým napětím odpovídající  $0,6 \div 0,7 U_n$ . Nevýhodou tohoto spojení je snížení záběrného momentu dle rovnice 2.1. Tím je toto zapojení omezeno na pohony, u nichž se nepředpokládá velký záběrový moment motoru.

$$M_z = M_{zn} \cdot \left( \frac{U_1}{U_{1n}} \right)^2 = M_{zn} \cdot \left( \frac{I_1}{I_{1n}} \right)^2 \quad [Nm; V, A] \quad 2.1$$

Asynchronní motory velkých výkonů připojených na síť např. 6 kV využívají tlumivek s železným jádrem připojených do uzlu statorového vinutí (obr 2.4). Výhodou je snížení napěťového namáhání tlumivky, kdy při rozběhu se rozdělí napětí v poměru reaktancí tlumivky a motoru.



Obr. 2.3



Obr. 2.4

[9], [10]

## 2.2 Kompenzační tlumivky

U sítí vvn (220 kV, 400 kV) je potřeba řešit vliv kapacity vedení. Především u vedení provozovaných naprázdno, nebo s malým zatížením je kapacitní reaktance příčinou vzniku tzv. Ferrantiho jevu, kdy úbytky napětí způsobené kapacitním proudem vedou k nárůstu napětí na začátku vedení, oproti napětí na jeho konci. Tlumivky připojené paralelně k vedení vytváří indukční zátěž, dodávají induktivní výkon a tím dochází k vykompenzování kapacity. Proto se tyto tlumivky někdy označují jako dekompenzační.

Instalovaný výkon tlumivek je navržen tak, aby induktivní reaktance  $X_L$  byla rovna přítomné kapacitní reaktanci  $X_C$ . Tlumivky se zapojují do kaskád se stupňovitou regulací. Indukčnost je nastavena podle aktuálního stavu kapacitní reaktance sítě tak, aby účinník  $\cos\varphi$  byl v rozsahu 0,95 až 1 induktivního charakteru.

### Kompenzační zařízení

Další oblastí využití kompenzačních tlumivek jsou kompenzační zařízení. Základním prvkem kompenzačního zařízení je kondenzátorové baterie zajišťující kompenzaci účinníku daného podniku, dílny, zařízení. U rozsáhlých provozů, kdy baterie zajišťuje kompenzaci většího počtu zařízení (skupinová, centrální kompenzace), je nutná regulace jalového výkonu.

V dnešní době nastává prudký rozvoj polovodičové techniky (spínané zdroje, frekvenční měniče, atd.), která způsobuje deformovaný průběh napětí. Kompenzace s vyšším obsahem harmonických může zapříčinit vznik rezonance s následným poškozením kondenzátorů. Tento problém řeší tlumivka připojená do série s kondenzátorovou baterií. Kombinace je navržena tak, aby byla zajištěna kompenzace základní harmonické a současně tvořila filtr pro vyšší harmonické, eventuálně nastavila rezonanční frekvenci mimo oblast jejího možného vzniku. Kompenzační tlumivky společně s kondenzátorovou tvoří základ kompenzačních zařízení zajišťujících kompenzaci jalové energie a současně filtraci vyšších harmonických.

#### Kompenzační zařízení využívající tlumivky lze podle regulace rozdělit

- neregulované kompenzace
- plynule regulované kompenzace
- stupňovitě regulované kompenzace

Plynule regulované kompenzace využívají tlumivku, která je fázově řízená tyristorem. Výhodou této kompenzace je vysoká přesnost vyladění, avšak poměrně složitý systém s vysokou cenou. Alternativou je stupňovitě spínaná kompenzace dosahující 1/5 ceny plynule regulovatelné kompenzace. Z důvodu méně přesné regulace jalového výkonu může docházet k překompenzování, popř. nedokompenzování výkonu. Z tohoto důvodu nejsou stupňovitě regulované kompenzace určeny pro sítě s častými změnami zatížení. Schéma filtračně-kompenzačního rozvaděče je přiloženo v příloze I.

#### **Stupňovitě regulované kompenzace**

V technické praxi se používají u stupňovitých kompenzací vn tato řešení

##### 1) Kompenzační stupně s omezovacími tlumivkami

Obsahují tlumivky pouze pro omezovací účely při zapínání kompenzačních stupňů. Jejich použití je pro sítě, kde instalovaný výkon spotřebičů s nelineární charakteristikou nepřesáhne 8 -10% celkového instalovaného výkonu. Hrozí totiž z důvodu absence filtrů vznik rezonance kondenzátorové baterie s indukčností sítě.

##### 2) Kompenzační stupně s trojfázovými tlumivkami s železným jádrem

Celé zařízení včetně regulátorů jalového výkonu (mikroprocesorové obvody) je situováno do kompenzačního rozvaděče. Nejčastější použití je pro sítě 6 a 10 kV, s kompenzačními výkony do 1MVar. Kromě regulace jalového výkonu také zajišťují ochranu před vyššími harmonickými tak, že LC obvod tvoří filtr naladěný nejčastěji na frekvenci 250, 350 Hz, nebo může být naladěný na frekvenci 189 Hz pro zamezení vzniku rezonance.

### 3) Kompenzační stupně s jednofázovými vzduchovými tlumivkami

Toto spojení opět zajišťuje nejen kompenzaci jalové energie, ale také slouží jako filtr vyšších harmonických (filtry jsou laděny podle požadavků na 150, 250, 350 Hz). Jelikož se tento typ kompenzace používá i v sítích vvn, dosahují výkony až desítek MVar. Spínání je zajištěno pomocí vakuových vypínačů, nebo stykačů.

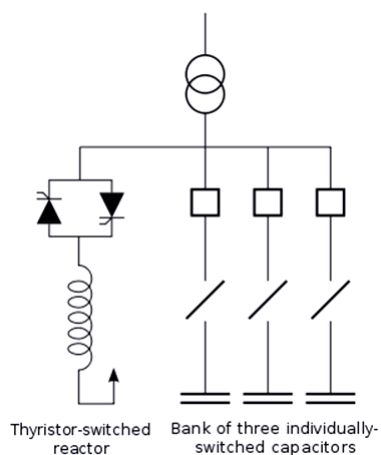
#### **Plynule regulované kompenzace**

Tento druh kompenzace využívá pro regulaci jalového výkonu tlumivku, jejíž proud je regulován fázově řízeným tyristorovým měničem. Tyto tyristorově řízené tlumivky jsou součástí tzv. SVC systémů a využívají se pro napětí do 36 kV.

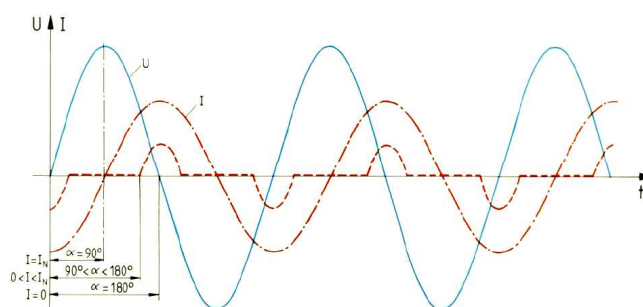
#### Kompenzační zařízení typu SVC

Kompenzační zařízení SVC (static var compensator), označováno také jako FKZ – filtračně kompenzované zařízení, je určeno pro přenosová vedení i těžký průmysl. Funkce SVC spočívá v eliminaci nežádoucích vlivů (vyšších harmonických, kolísání napětí, prudkých změn jalového výkonu). Typickými zařízeními pro využití SVC jsou obloukové pece, válcovací tratě, železniční napájecí tratě.

Kompenzační zařízení SVC se skládá z antiparalelního tyristorového měniče, tlumivky a paralelně připojené kondenzátorové baterie, která je většinou tvořena soustavou filtrů. Proto je kondenzátorová baterie nejen zdrojem kompenzačního výkonu, ale rovněž plní funkci filtru. Tlumivky označujeme jako dekompenzační. Jejich provedení je možné buď ve vzduchovém, nebo olejovém provedení. Výkon tlumivky se volí dle výkonu kompenzačních filtrů. Pokud jsou výkony tlumivky a filtrů shodné, lze provádět regulaci jalového výkonu dodávaného do sítě od nuly (otevřený tyristorový měnič) až do kompenzačního výkonu instalovaných filtrů (uzavřený tyristorový měnič). Obr. 2.6 zobrazuje napětí sítě  $U$  a regulaci proudu dekompenzační tlumivky  $I$  při změně úhlu tyristorového měniče v rozmezí  $90^\circ$  až  $180^\circ$ .



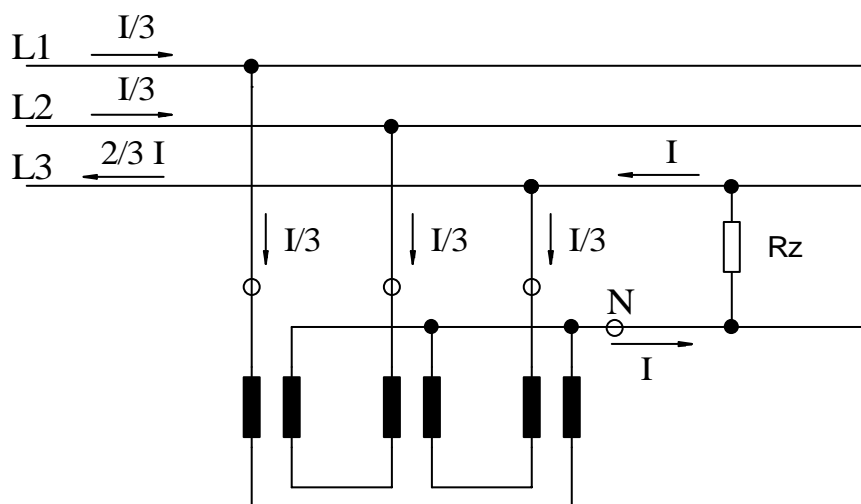
Obr. 2.5 Zapojení kompenzace SVC



Obr. 2.6  $U$  a  $I$  ve větvi s tyristorově řízenou tlumivkou [8], [11], [13], [23]

## 2.3 Tlumivky pro vytvoření umělého uzlu

Nutnost vytvoření umělého uzlu může nastat například u transformátoru bez vyvedeného středu, který chceme provozovat na čtyřvodičové síti, nebo pokud potřebujeme rozložit nesouměrné zatížení v síti. Obr. 2.7 znázorňuje zapojení tlumivky do lomené hvězdy za účelem rovnoměrnějšího zatížení při jednofázovém odběru. Tlumivka je řešena obdobně jako trojfázový transformátor v jádrovém provedení.



Obr. 2.7 Tlumivka v zapojení pro zmírnění vlivu nesouměrného zatížení

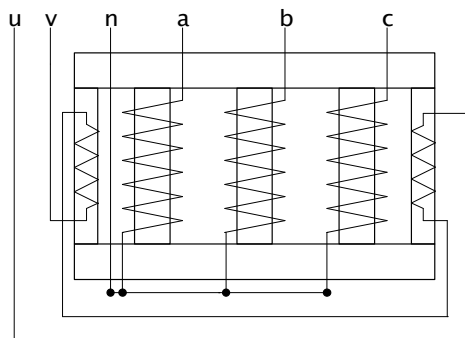
### Princip působení

Pokud je provoz souměrný, pak tlumivka odebírá ze sítě pouze magnetizační proud. Při nesouměrném zatížení (viz obr. 2.7) dochází vlivem tlumivky k přerozdělení proudů tak, že každou fází tlumivky teče  $1/3$  celkového proudu  $I$  odebíraného zátěží  $R_z$ . Výsledkem je odlehčení vedení v zatížené fázi mezi transformátorem a tlumivkou (fází L3 protéká pouze  $2/3 I$ ). Aby byl tento odlehčený úsek vedení co největší, je vhodné umístit tlumivku do blízkosti nesouměrného zatížení. Díky tlumivce dosáhneme zmenšení ztrát v transformátoru a také rovnoměrnějšího zatížení vodičů.

[8]

## 2.4 Zemnicí tlumivky

Někdy se užívá názvu uzemněný transformátor podle konstrukce, která je shodná s přístrojovým transformátorem napětí ve spojení Yy s uzemněným nulovým bodem na primární straně. Toto provedení umožňuje odvádění statických nábojů ze sítě a rovněž plní funkci měření parametrů sítě pomocí měřících přístrojů zapojených na sekundární straně. Pro indikaci zemního spojení je tlumivka vyráběná ve 4 – jádrovém, nebo 5 – jádrovém provedení s pomocným vinutím. Tlumivka na obrázku je pro lepší přehlednost zakreslena bez primárního vinutí.



Obr. 2.8 Tlumivka pro detekci zemního spojení

### Indikace zemního spojení

Zemní spojení jedné fáze, je u zbylých dvou nepostižených fází doprovázeno nárůstem fázových napětí na sdruženou hodnotu  $(U_s = \sqrt{3}U_f)$  proti zemi, zatímco napětí postižené fáze je minimální. Tato změna se rovněž promítne ve změně magnetického toku procházejícího pomocnými jádry. Jestliže při souměrném provozu je indukované napětí pomocných fází nulové (z důvodu nulového  $\phi$ ), tak při zemním spojení se indukuje napětí úměrné  $\sqrt{3} \Phi_N$ , který prochází hlavními jádry při normálním provozu. Tím je spuštěna signalizace zemního spojení připojená ke svorkám u, v.

[8]

## 2.5 Vyrovnávací tlumivky

Tyto tlumivky nachází uplatnění u paralelně pracujících obvodů, kde omezují vyrovnávací proud, který vzniká v důsledku rozdílných napětí těchto obvodů. V elektroenergetice se využívají u paralelně pracujících alternátorů, nebo transformátorů s rozdílným převodem, ale i napětím nakrátko. Rozdíl v převodovém poměru způsobuje vyrovnávací proud, který je omezen impedancí transformátoru. Tlumivka se zapojuje mezi dva paralelní obvody (transformátory) s vinutím rozděleným na dvě části, kde počty závitů odpovídají převrácenému poměru jmenovitých proudů. Vyrovnávací proud se spotřebuje k vytvoření magnetického pole tlumivky (magnetizační proud). Jeho velikost lze omezit zmenšením magnetické indukce a použitím magnetického obvodu bez mezer.

Rozdílné napětí nakrátko  $u_k$  vede k nerovnoměrnému zatížení transformátorů, při jejich paralelním provozu. Zatížení transformátorů s různým napětím nakrátko je totiž v převráceném poměru k napětí nakrátko (nejvíce zatížen je transformátor s nejmenším  $u_k$ ).

$$i_1 : i_2 : \dots : i_n = \frac{1}{u_{k1}} : \frac{1}{u_{k2}} : \dots : \frac{1}{u_{kn}}$$

Předřazením tlumivky k transformátoru s menším  $u_k$ , má tedy za následek rovnoměrnější zatížení skupiny transformátorů.

V minulosti se těchto tlumivek využívalo v traktu u šestifázových transformátorů pro rtuťové usměrňovače

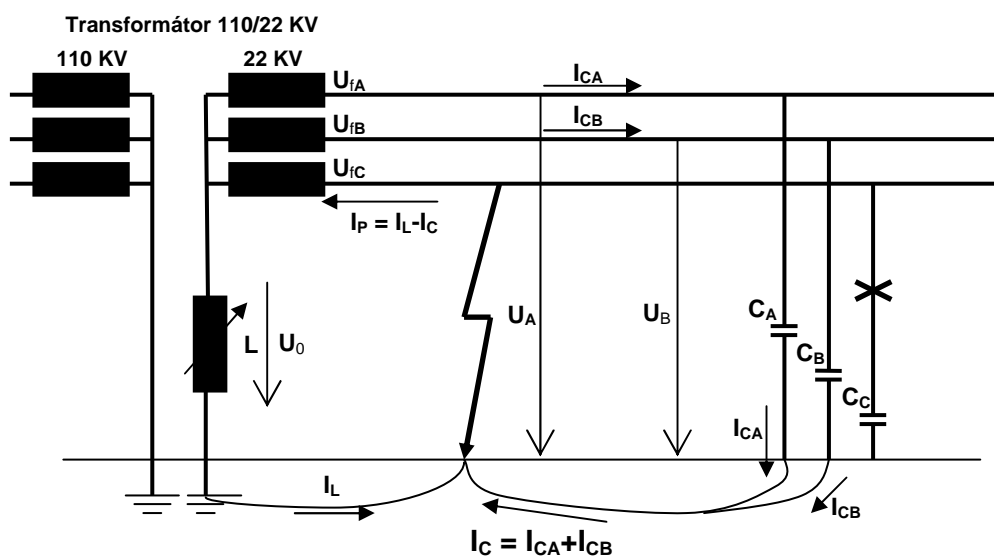
[8]

## 2.6 Zhášecí tlumivky

Zhášecí tlumivka je elektrické zařízení zajišťující provoz u tzv. kompenzovaných elektrických sítí v případě poruchy. Používá se jich v sítích 6, 10, 22, 35, 110 kV. Dojde-li například ke zkratu vlivem přetržení jedné fáze vedení, je díky tlumivkám soustava schopna fungovat dál se zbývajících dvěma fázemi.

Funkce tlumivky v síti spočívá ve vykompenzování kapacitního proudu, který teče místem poruchy, následkem spojení některé fáze se zemí. U rozsáhlejších vedení mohou tyto proudy dosahovat značných velikostí. Tlumivka se do sítě připojuje mezi uzel transformátoru a zem, tím dochází k vykompenzování příčné reaktance vedení s kapacitním charakterem. Dosáhneme tak rezonance proudu v případě poruchy. Teoretické nulové hodnoty proudu však nelze dosáhnout, s ohledem na svodový proud, který bude tím větší, čím bude síť rozsáhlejší a provozní napětí vyšší.

Princip kompenzace zemního spojení:



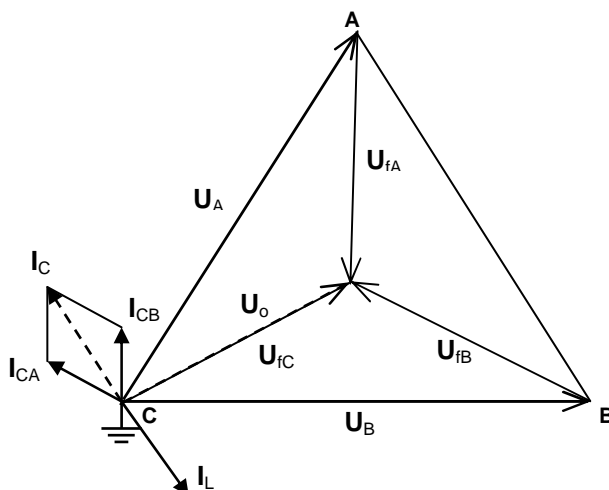
Obr. 2.9 Kompenzace zemního spojení

Je-li síť souměrná a její provoz bez poruchy, potom napětí uzlu transformátoru  $U_0 = 0$ . V případě zemního zkratu jedné fáze dochází k deformaci fázových napětí, kdy zbylé “zdravé” fáze mají proti zemi sdružené napětí a napětí uzlu transformátoru  $U_0 = -U_{fC}$ . Zvýšeným napětím dochází k nárůstu kapacitních proudů “zdravých fází”. Proudů  $I_{CA}$  a  $I_{CB}$  tekou do místa zkratu, kde se vektoro-

vě sčítají s proudem tekoucím tlumivkou do místa zkratu, jehož hodnota je při dokonalém zemním spojení dána vztahem 2.2

$$\mathbf{I}_L = -j \frac{\mathbf{U}_0}{\omega L} \quad [A; V, A, \text{rad} \cdot s^{-1}, H] \quad 2.2$$

Při vhodně zvolené indukčnosti  $L$ , dojde k uhašení oblouku, vlivem opačných fází induktivního a kapacitního proudu.



Obr. 2.10 Fázorový diagram kompenzace

### Výpočet poruchového proudu $\mathbf{I}_C$

Pro výpočet poruchového proudu vycházíme z napětových a proudových poměrů sítě

Poruchový proud:	$\mathbf{I}_C = \mathbf{I}_{CA} + \mathbf{I}_{CB}$	2.3
------------------	--	-----

Napětí fáze s poruchou:	$\mathbf{U}_C = 0$	2.4
-------------------------	--------------------	-----

Proudy zbylých dvou fází B, C:	$\mathbf{I}_{CA} = j\omega C_A \mathbf{U}_A$	2.5
--------------------------------	--	-----

	$\mathbf{I}_{CB} = j\omega C_B \mathbf{U}_B$	2.6
--	--	-----

	$\mathbf{U}_A - \mathbf{U}_0 - \mathbf{U}_{fA} = 0$	2.7
--	---	-----

Rovnice sítě:	$\mathbf{U}_B - \mathbf{U}_0 - \mathbf{U}_{fB} = 0$	2.8
---------------	---	-----

	$\mathbf{U}_C - \mathbf{U}_0 - \mathbf{U}_{fC} = 0$	2.9
--	---	-----

Z předchozích rovnic vyplývají tyto skutečnosti:

Nastane-li dokonalé zemní spojení, bude napětí postižené fáze nulové a na uzlu transformátoru dostaneme záporné fázové napětí postižené fáze  $\mathbf{U}_0 = -\mathbf{U}_{fC}$

$$\mathbf{U}_A = \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_{fA} = -\mathbf{U}_{fC} + \mathbf{U}_{fA} = -\mathbf{U}_{fC} + \mathbf{U}_{fC} \cdot e^{j-120^\circ} = \mathbf{U}_{fC} \cdot (e^{-j120^\circ} - 1) = \sqrt{3} \cdot e^{j150^\circ} \mathbf{U}_{fC} \quad 2.10$$



$$\mathbf{U}_B = \mathbf{U}_0 + \mathbf{U}_{fB} = -\mathbf{U}_{fC} + \mathbf{U}_{fB} = -\mathbf{U}_{fC} + \mathbf{U}_{fC} \cdot e^{+j120^\circ} = \mathbf{U}_{fC} \cdot (e^{+j120^\circ} - 1) = \sqrt{3} \cdot e^{-j150^\circ} \mathbf{U}_{fC} \quad 2.11$$

Při dokonalém zemním spojení se fázová napětí zbylých dvou fází změní na sdruženou hodnotu.

Za předpokladu že  $C = C_A = C_B$  dostaneme dosazením do vztahu pro poruchový proud:

$$\mathbf{I}_C = \mathbf{I}_{CA} + \mathbf{I}_{CB} = -3j\omega C \cdot \mathbf{U}_{fC} = 3j\omega C \cdot \mathbf{U}_0 \quad 2.12$$

Poruchový proud předbíhá napětí uzlu  $\mathbf{U}_0$  o  $90^\circ$  stupňů, jeho velikost je dána součtem kapacitních proudů nepoškozených fází. Poruchový proud není závislý na vzdálenosti od transformátoru, závisí je na kapacitě  $C$  fází vůči zemi a hodnotě napětí uzlu  $U_0$  při zemním spojení. Orientačně se počítá u venkovních vedení s kapacitními proudy 0,063 A/km pro venkovní vedení 22 kV. U kabelových vedení nabývají tyto hodnot podstatně vyšších hodnot a závisí na průřezu jádra, konstrukci kabelu, druhu izolace. Orientačně pro kabel 22 kV s průřezem 120 až 240 mm<sup>2</sup> a papírovou izolací nabývají kapacitní proudy hodnot 3,5 až 4,5 A/km.

#### Návrh zhášecí tlumivky:

Zhášecí tlumivky se označují velikostí zemního proudu, který mají kompenzovat, a fázovým napětím. Z těchto hodnot se také vypočítává jmenovitý výkon tlumivky. Známe-li poruchový proud, můžeme jednoduše určit kompenzační proud tlumivkou. Úplné kompenzace nikdy nedosáhneme, chceme-li se ji však přiblížit vycházíme z předpokladu rovnosti proudů kapacitního a induktivního v místě poruchy.

Pro plnou kompenzaci platí:

$$\mathbf{I}_L = -\mathbf{I}_C \quad 2.13$$

$$-j \frac{\mathbf{U}_0}{\omega L} = -3j\omega C \mathbf{U}_0 \quad 2.14$$

Vyjádřením indukčnosti  $L$  z předchozí rovnice, dostaneme indukčnost zhášecí tlumivky pro plnou kompenzaci zemního kapacitního proudu.

$$L = \frac{1}{3\omega^2 C} \quad [H; s^{-1}; F] \quad 2.15$$

$C$ .....fázová kapacita izolované sítě

Reaktance se reguluje buď stupňovitě, nebo plynule změnou vzduchové mezery (viz kap. 1.2.3) mezi dvěma polovinami jádra. Na regulační rozsah 1:10 je potřeba změny vzduchové mezery asi 1:30

[8], [12], [22]

## 2.7 Vyhlazovací tlumivky

Vyhlazovacích tlumivek je užíváno v sériovém spojení u stejnosměrných systémů, kde zajišťují vysokou impedanci pro harmonické proudy a současně omezují zkratový proud při poruše.

Uplatnění nachází v průmyslových aplikacích s napětím do 10 kV a v dálkových přenosech s napětím přesahujícím 50 kV.

### Systémy HVDC

Kromě již zmíněných oblastí střídavého napětí, nachází tlumivky uplatnění také při přenosu stejnosměrného napětí. Jedná se o tzv. HVDC systémy (High Voltage Direkt Current) zajišťující přenos výkonu na dlouhé vzdálenosti (podmořské, podzemní kabely). Pomocí HVDC je přenášen výkon od 100 MW, častěji (1–3 GW) na vzdálenosti 300 až 1400 km. Výhodou takového přenosu jsou nižší ztráty (poloviční než u střídavého přenosu energie) a použití pouze dvou vodičů. Přenos je řešen pomocí dvou měničů (konvektorů), kde jeden plní funkci usměrňovače a druhý funkci střídače. V některých podmínkách může být jako zpětného vodiče použita zem. Tato možnost je aplikovatelná pouze v neobydlených územích, kde zemní stejnosměrný proud nemůže ovlivňovat ostatní elektrická zařízení a způsobovat korozi potrubí.

Nevýhodou stejnosměrného přenosu je náročnější systém pro přeměnu elektrické energie a instalace kompenzačních zařízení pro dodávku jalové energie.

[19], [21]

## 3 Podmínky a požadavky pro volbu typových VN tlumivek

V následujícím textu jsou shrnuty základní parametry a výrobní údaje, které jsou požadovány pro typové tlumivky uvedené v kapitole typové aplikace vn tlumivek v energetice.

### 3.1 Provedení

S ohledem na podmínky, ve kterých tlumivky budou aplikovány, rozlišujeme jejich základní provedení. Podrobnější specifické rozdělení uvádí norma ČSN EN 60076-6

- jednofázové, nebo trojfázové
- v provedení suchém, nebo olejovém
- s feromagnetickým obvodem nebo bez něho
- vnitřní nebo venkovní provedení
- s magnetickým stíněním nebo bez stínění
- s indukčností konstantní, nebo proměnnou

[15]

### 3.2 Dovolené oteplení

Pro normální provozní podmínky je dovolené oteplení stanoveno pro nadmořskou výšku do 1000 m a teplotu chladícího vzduchu  $-25 \div 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

#### Požadavky na vinutí

Teplota působí nepříznivě na izolační materiál vinutí. Pro vhodnou volbu druhu izolace rozlišuje norma ČSN EN 60085 tepelné třídy odpovídající písmenům (Y, A, E, B, F, H). Tepelná třída určuje maximální teplotu ve  $^{\circ}\text{C}$ , pro kterou je izolační materiál vhodný. U tlumivek vn se vzduchovým chlazením se nejčastěji používá tepelné třídy F ( $155\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), pro náročnější aplikace H ( $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Pro olejové přirozené chlazení je používáno třídy A ( $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) a B ( $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), přičemž dovolené oteplení vinutí stanovuje norma na  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Teplotu, kterou nesmí vinutí překročit při průchodu tepelného zkratového proudu, nebo krátkodobého proudu uvádí norma ČSN IEC 60076-5.

#### Požadavky na jádro a ostatních konstrukčních prvků

Pro tyto materiály nejsou stanoveny maximální teploty. V žádném případě však nesmí dojít k poškození kterékoliv části tlumivky

#### Požadavky na oteplení oleje

Pro olej je stanoveno maximální oteplení  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , měřeno v horní vrstvě oleje (asi 10 cm pod povrchem).

[15], [18]

### 3.3 Jmenovité údaje

Následující přehled jmenovitých údajů poskytuje požadované hodnoty pro výrobu typových tlumivek určených pro aplikaci v obvodech vysokého napětí. Také se k těmto hodnotám vztahují záruky výrobce a provedené zkoušky.

- **tlumivky pro omezení proudů**

*Jmenovitý proud  $I_n$*

- Efektivní hodnota proudu v ustáleném chodu zařízení.

*Jmenovitý krátkodobý proud  $I_{kn}$*

- Proud, který protéká tlumivkou po krátkou dobu  $t_{kn}$  (např. záběrový proud při zapínání).

*Jmenovitý tepelný zkratový proud  $I_{Zn}$* 

- Z hlediska poruchových stavů se udává nejvyšší možná ef. hodnota ustáleného zkratového proudu a doba jeho působení  $t_{Zn}$  (standardně 2 sekundy), která se může vyskytnout a kterou konstrukce vydrží.

*Jmenovitý mechanický zkratový proud  $I_{MZn}$* 

- Udává maximální vrcholový proud při zkratu, pro který je tlumivka konstruována.

*Činitel vazby  $K$* 

- Představuje vzájemnou reaktanci vyjádřenou buď v procentech jmenovité reaktance, nebo v poměrných jednotkách.

*Jmenovitá impedance nakrátko  $Z_K$* 

- Impedance při jmenovitém tepelném zkratovém proudu a jmenovité frekvenci. Rozlišují se jmenovité jednofázové a trojfázové impedance nakrátko. Nutnost jejich stanovení závisí na činiteli vazby. Obdobně se v některých případech určuje *jmenovitá impedance krátkodobá*, nebo *jmenovitá trvalá impedance*.

- **kompensační tlumivky**

*Jmenovité napětí  $U_N$* 

- Udává provozní napětí sítě při jmenovité frekvenci.
- Je základním parametrem pro návrh zařízení.

*Nejvyšší provozní napětí  $U_{MAX}$* 

- Je nejvyšší napětí, při kterém může být kompenzační tlumivka ještě provozována.
- V některých případech může jmenovité napětí být současně nejvyšším provozním napětím.

*Jmenovitý výkon  $Q_N$* 

- Představuje jmenovitou jalovou hodnotu výkonu pro jmenovité napětí a jmenovitý proud.

*Reaktance tlumivky*

- U trojfázových kompenzačních tlumivek se pro definici jmenovitých parametrů vyjadřují následující reaktance. Základem je jmenovitá reaktance  $X_N$  (vyjadřována v ohmech na fázi při  $U_N$  a  $f_N$ ). Dále se používá nulová složka reaktance  $X_0$  (dává se do poměru s  $X_N$  pro posouzení konstrukce tlumivky) a vzájemná reaktance  $X_M$  (stanovuje se v procentech  $X_N$ ).

Dalším požadavkem na kompenzační tlumivky je její zaručená linearita. Tyto tlumivky musí být lineární až do maximálního provozního napětí s tolerancí reaktance  $\pm 5\% X_N$ .

- **filtrační tlumivky**

*Jmenovitá hodnota napětí  $U_N$  (proudu  $I_N$ )*

- Zdáli je u filtračních tlumivek udána jmenovitá efektivní hodnota napětí, nebo proudu závisí na způsobu jejich zapojení v síti (sériové, nebo paralelní).

*Jmenovitý zkratový proud  $I_K$*

- Filtrační tlumivky musí odolávat možným tepelným (ustálená složka  $I_K$ ) i dynamickým účinkům ( $1,8 \cdot \sqrt{2}$  násobek ustálené složky  $I_K$ ). Pro dimenzování se vychází z podmínek systému, kde bude tlumivka instalována.

*Jmenovitý činitel kvality  $Q$*

- Je dán poměrem reaktance k ztrátovému odporu při stanovené frekvenci. Určuje ztráty v obvodu a tlumení přechodných jevů.

*Jmenovité proudové (napěťové) spektrum*

- Spektrum určuje efektivní hodnoty proudu (popřípadě napětí při paralelním zapojení) při stanovených frekvencích.

*Jmenovitá indukčnost  $L$*

- Stanovení jmenovité indukčnosti filtračních tlumivek je důležité pro zajištění správné charakteristiky.

Dále se u filtračních tlumivek udává podobně jako u omezujících tlumivek hodnota *krátkodobého proudu* (např. při zapínání kondenzátorů).

- **uzemňovací tlumivky**

*Jmenovité napětí  $U_N$*

- Sdružená hodnota jmenovitého napětí musí odpovídat sdružené hodnotě napětí v místě připojení tlumivky.

*Maximální provozní napětí  $U_{MAX}$*

- Nejvyšší hodnota sdruženého napětí, která se může objevit na svorkách tlumivky při provozu.

*Jmenovitý proud v nulovém bodě  $I_N$*

- Je proud, který prochází nulovým bodem v důsledku nevyvážené trojfázové sítě. Tlumivka musí vyhovovat požadavkům na trvalý i krátkodobý proud v nulovém bodě.

*Jmenovitá nulová složka impedance  $Z_0$* 

- Hodnota je udávána v ohmech na fázi pro jmenovitou frekvenci. V případě, že je tlumivka přímo spojená se zemí, lze hodnotu nulové impedance určit z max. provozního napětí a jmenovitého krátkodobého proudu (jeli tento proud známý).

- **tlumící tlumivky**

*Jmenovitý proud  $I_N$* 

- Efektivní hodnota proudu při trvalém provozu tlumivky. Velikost je navržena podle kondenzátorů, u kterých bude proud omezován.

*Jmenovitý proud při zapínání (vypínání)*

- Nejvyšší hodnota proudu, na který je tlumivka dimenzována po určitou dobu. Též tzv. *jmenovitý krátkodobý proud*.

*Jmenovitá indukčnost  $L$* 

- Stanovení jmenovité indukčnosti u tlumících tlumivek je důležité pro zajištění správné charakteristiky a tím správné činnosti.

Pro zajištění odolnosti vůči zkratovým proudům je u tlumících tlumivek stejně jako u omezujících tlumivek vyžadován *jmenovitý tepelný a mechanický zkratový proud*.

- **zhášecí tlumivky**

*Jmenovité napětí  $U_N$* 

- Jmenovité napětí u zhášecí tlumivky je dáno napětím, které se může objevit v místě připojení (nulový bod transformátoru a zem) při zemním spojení. Nejčastěji je to fázové napětí sítě.

*Nejvyšší provozní napětí  $U_{MAX}$* 

- Je nejvyšší napětí (v důsledku nesymetrie odběrů) při kterém může být zhášecí tlumivka trvale provozována. V některých případech může jmenovité napětí být současně nejvyšším provozním napětím.

*Jmenovitý proud  $I_N$* 

- Nejvyšší proud, který prochází tlumivkou při zemním spojení. Tlumivka musí být konstruována tak, aby byla schopna tento proud vést po dobu stanovenou výrobcem (nejčastěji 2h). V případě regulovatelné tlumivky se jmenovitý proud vztahuje na nejmenší indukčnost.

*Linearita*

- U zhášecích tlumivek je vyžadována lineární charakteristika až do násobku 1,1  $U_N$  s tolerancí  $\pm 5\%$

- **vyhlazovací tlumivky**

*Jmenovité stejnosměrné napětí  $U_N$  a proud  $I_N$*

- Stejnosměrné hodnoty tlumivky při trvalém provozu

*Jmenovitá přírůstková indukčnost  $L_{Np}$*

- Velikost přírůstkové indukčnosti udává výrobce pro daný kmitočet a jmenovitý stejnosměrný proud

*Spektrum harmonických proudů*

- Stanovuje spektrum proudů pro stanovené kmitočty

Pro bezpečnou funkci při poruše je nutné podobně jako předchozích případech uvést *max. provozní napětí, krátkodobý proud, zkratový proud* včetně dovolených dob trvání. U filtračních tlumivek vyžadujeme lineární charakteristiku.

[15], [17]

### 3.4 Zkoušky

Podmínkou provedených zkoušek je, aby všechny vnější součásti, které mohou ovlivnit výsledky zkoušek byly instalovány. Dle normy ČSN EN 60289 jsou výše popsané tlumivky podrobovány v závislosti na typu příslušným zkouškám

**Kusové zkoušky** – měření odporu vinutí, měření reaktance (impedance, indukčnosti), měření ztrát, dielektrické zkoušky, měření proudu a ztrát naprázdno, měření izolačního odporu, kapacity, ztrátového činitele, zkouška přepínače odboček

**Typové zkoušky** – zkoušky dielektrické (atmosférickým impulsem), oteplovací zkouška, měření vibrací, měření hladiny akustického tlaku, měření spotřebovaného výkonu pro chlazení (jeli instalováno)

**Zvláštní zkoušky** – měření nulové složky reaktance, vzájemné reaktance, činitele ztrát, harmonických proudů, měření magnetické charakteristiky, zkouška zkratovým proudem, zkouška mechanické rezonance, měření linearity, měření zvukové hladiny při provozní teplotě

Podrobnější specifikace zkoušek v závislosti na typu tlumivky je provedena v příslušných normách ČSN EN 60289 a ČSN EN 60076-6.

[15], [17]

## 4 Zhodnocení a závěr

Cílem této bakalářské práce bylo objasnit problematiku současně používaných tlumivek vysokého napětí a jejich uplatnění v typových aplikacích elektroenergetiky. V jednotlivých kapitolách byl probrán princip působení, konstrukční uspořádání, typové aplikace (např. uzemnění uzlu transformátorů, tlumivky jako prvky rezonanční, zhášecí, k tlumení rázů, regulaci transformátoru, vytvoření nulového bodu apod.) Členění a názvy tlumivek vychází z platných norem ČSN EN 60289 a ČSN EN 60076-6 týkajících se jednofázových tlumivek s výkonem větším než 1 kVAr, a tlumivek trojfázových s výkonem vyšším než 5 kVAr. Jednalo se o tlumivky kompenzační, tlumivky pro omezení proudu, tlumící tlumivky, filtrační tlumivky, uzemňovací tlumivky, zhášecí tlumivky, vyhlazovací tlumivky.

Olejové uspořádání tlumivek je aplikováno na kterékoliv výše uvedené typy s přednostním uplatněním v sítích vysokého napětí a pro venkovní prostředí. Nejrozšířenějšími zástupci olejového provedení jsou zhášecí tlumivky, někdy též označovány jako Petersenovy cívky (viz. příloha II), u nás vyráběné firmou EGE s.r.o. Často bývají konstruovány ve společné nádobě se zemnicími transformátory. Dalším světovým výrobcem, který se zaměřuje na olejové provedení tlumivek je společnost ABB s.r.o., vyrábějící kromě jiného tlumivky vyhlazovací a kompenzační.

V závěru práce jsou shrnuty požadavky na provedení, dovolené oteplení, jmenovité údaje a zkoušky, na které musí být tlumivky dimenzovány v závislosti na aplikačním využití. Tyto údaje opět odpovídají platným normám ČSN týkajících se výkonových tlumivek a transformátorů.

Návaznost této práce může být zaměřena na obecné příklady návrhů tlumivek, návrh tlumivky pro specifickou aplikaci, včetně simulace oteplení konstrukčních materiálů v programových prostředích, nebo simulaci zemního spojení v obvodu se zhášecí tlumivkou.

Bakalářská práce vychází z uvedené literatury, prezentačních podkladů a katalogů výrobců. Všechny tyto prameny jsou uvedeny v seznamu použité literatury.



## Literatura

- [1] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika I*. 4. vydání. Praha: Informatorium, 1995. 191 s. ISBN 80-86073-90-4.
- [2] DRAXLER, Karel; KAŠPAR, Petr; RIPKA, Pavel. *Magnetické prvky a měření*. 1. vydání. Praha: ČVUT, 1999. 276 s. ISBN 80-01-01080-5.
- [3] VAŠÍČEK, Antonín. *Typizované napájecí transformátorky a vyhlazovací tlumivky*. 2. vydání. Praha: SNTL, 1975. 215s.
- [4] KRUML, Vincenc; ŠTEFL Milan. *Transformátory pro obloukové svařování*. 3. vydání. Praha: SNTL, 1985. 243s.
- [5] FAKTOR, Zdeněk. *Transformátory a cívky*. 1. vydání. Praha: BEN – technická literatura, 1999. 393 s. ISBN 80-86056-49-x.
- [6] ČERMÁK, Tomáš. *Elektrické stroje I: Transformátory*. 1. vydání. Ostrava: VŠB, 1984. 142 s.
- [7] HAPL, Josef; Nosek Karel. *Stavba transformátorů*. 1. vydání. Praha: ČVUT, 1971. 310 s.
- [8] LIST, Vladimír; PEŠÁK, František; Drkoš Felix. *Elektrotechnika III: Elektrické stroje II*. 2.vydání. Praha: SNTL, 1963, 683 s.
- [9] SLAVÍK, Gabriel. *Elektrické přístroje IX .díl: Přístrojové transformátory, kondenzátory, reaktory*. 1. vydání. Praha: SNTL, 1961, 148 s.
- [10] MĚŘIČKA, Jiří; HAMATA Václav; VOŽENÍLEK Petr. *Elektrické stroje*. 1.vydání. Praha: ČVUT, 1993. 311 s. ISBN 80-01-01020-1.
- [11] HRADÍLEK, Zdeněk. *Elektroenergetika distribučních a průmyslových zařízení*. 1. vydání. Ostrava: VŠB-TU, 2008. 208 s. ISBN 978-80-248-1696-8.
- [12] MACENAUER, Michal. *Elektromagnetické přechodné děje v elektroenergetice*. Ostrava: VŠB-TU, 2002. 76 s. Diplomová práce.
- [13] ROZEHNAL, Petr. *Kompenzace účinníku a eliminace negativních zpětných vlivů na napájecí síť u elektrické obloukové pece*. Ostrava: VŠB-TU, 2009. 66 s. Diplomová práce .
- [14] BORISOV, Igor. *High Voltage Direkt Current Transmission*. University of Minnesota, 2002.
- [15] ČSN EN 60076-6: Výkonové transformátory – Část 6: Tlumivky
- [16] ČSN EN 60076-2: Výkonové transformátory - Část 2: Oteplení
- [17] ČSN EN 60289: Tlumivky
- [18] ČSN EN 60085: Elektrická izolace - Tepelná klasifikace
- [19] URL: <<http://www.abb.cz/>> [cit. 2010-4-15].
- [20] URL: <<http://www.ege.cz/>> [cit. 2010-4-15].
- [21] URL: <<http://www.skolaem.ic.cz/rozvod%20ee.pdf>> [cit. 2010-4-20].
- [22] URL: <[http://www.powerwiki.cz/attach/X15PJE/PJE\\_pr05\\_zemni\\_spojneni.pdf](http://www.powerwiki.cz/attach/X15PJE/PJE_pr05_zemni_spojneni.pdf)> [cit. 2010-4-29].
- [23] URL: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=25835](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25835)> [cit. 2010-4-29].

## Seznam příloh

Příloha I – Přehledové schéma Filtračně-kompenzačního rozvaděče 6 kV [11]

Příloha II – Zhášecí tlumivka vn [20]

Příloha III – Kompenzační tlumivka vvn, tlumivka k omezení proudu vn [19]

Příloha IV – Schéma stanice HVDC [14]